

回折格子の分光の機能を理解するための物理学基礎実験の改善

豊田 新・村橋美香*・宮川和也

岡山理科大学理学部応用物理学科／理科教育センター

*岡山理科大学大学院理学研究科応用物理学専攻

(2016年10月20日受付、2016年12月5日受理)

1. 緒言

回折格子は種々の光を分光するために、さまざまな分析機器に用いられる非常に重要な基礎的な素子である。今日、さまざまな高度の分光分析が可能になったのはひとえに回折格子のおかげであるといっても過言ではない。

本学の1年生あるいは2年生を対象に、理科教育センターが開講している物理学基礎実験、また物理学実験において、分光計を用いた回折格子の実験を行っている。この中で、理学部の学生を対象とした物理学基礎実験において回折格子の分光という機能をよりよく理解できるよう実験内容を改善したので、その内容について報告する。

2. 回折格子による分光の原理

回折格子は、ガラス中に光を通す細い溝(スリット)が等間隔で並んでおり、現在実験で使用している島津ホログラフィックグレーティング G-200 では、10mm に 2000 本の溝が並んでいる。溝を透過した光は回折し、十分遠くのスクリーン(本実験の場合には望遠鏡をのぞく眼)に到達するとき、隣の溝を透過した光との光路差が、溝の間隔を d 、回折角を θ として、

$$d \sin \theta$$

となる(図1)。

ここで、この光路差が光の波長 λ の整数倍であれば

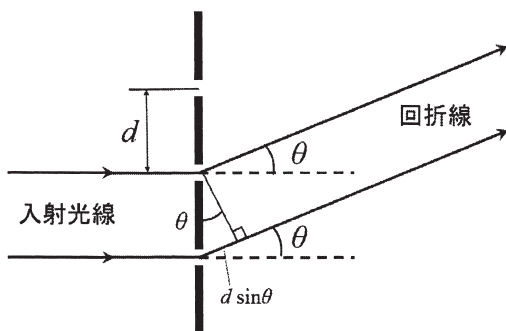


図1 回折格子による分光の原理

回折した光同士が強め合い、光の線(回折線)として観測される。すなわち、光が強め合う条件は、 n を正の整数として

$$n\lambda = d \sin \theta$$

である。実際には1次の回折線のみが観測される(観測しやすい)ため、この条件は、

$$\lambda = d \sin \theta \quad (1)$$

となる。この式からわかるように、波長が回折角の関数となっているため、異なる回折角で異なる波長(色)の光が観測される。複数の波長の光が混合していたり、波長が連続に分布していたりする場合には、回折格子を用いることによって、波長ごとに光を分ける(分光)することができる。

3. 分光計による回折角の測定

本実験では(株)島津理科社製、分光計 S-7 を用い、次のように回折角を測定する。分光計は、スリットのついたコリメータ、回転盤、望遠鏡が一体となっており、望遠鏡は回転盤に固定されて回転させることができる。スリットの近くに光源をおき、コリメータを通して、回転盤の中央においた回折格子に光を導く。回折格子で回折した光の像を望遠鏡を通して眼で観察する。1次の回折線は左右に2つ観察されるので、左側

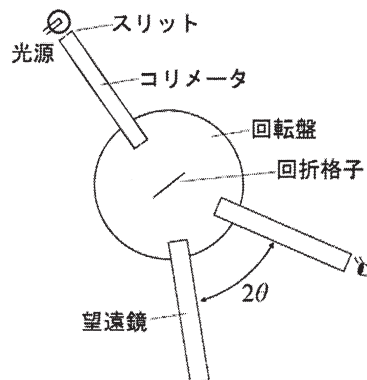


図2 分光計による回折角の測定

の回折線を望遠鏡の視界にある十字線の中央に合わせて回転盤の角度を読み、次いで同様に右側の回折線についても十字線の中央に合わせて角度を読む。回転盤の角度の読みはノギスの原理で分の単位まで読むことができ、また相対した（180°反対側の）位置において1回の測定で2つの読みを得ることができる。それぞれの位置における読みを、左右の回折線について差を取ることで、回折角 θ の2倍の 2θ をデータとして得る。2つの位置による読みを平均することで、読み取りの誤差を小さくできるほか、そのずれから読み取りの誤りをチェックすることができる。

4. 実験課題とその改善の試み

実験の課題において、学生はこの測定によって得られた回折角 θ と既知の回折線の幅 d から、式(1)を用いて、光の波長 λ を求めることが課題として与えられる。

当初¹⁾、本実験課題においてはNaランプのみを用いて実験を行い、非常に近接して観測されるオレンジ色の可視領域の発光、589.5924nm 及び 588.9951nm²⁾を1種類の発光として、これのみを観測することとしていた。また、回転盤上で、本来光源からの光路に対して垂直に置くべき回折格子の角度をずらして同様の実験を行うこととしていた。

確かに、回折格子の面を光路に対して垂直に置くことは実験の手順において重要である。もし、垂直から角度 α だけずれていたとすれば、溝の間隔を、本来の値 d ではなく、 $d \cos \alpha$ と小さくしたことに相当することになる。実際の波長は一定であるため、(1)式を満たすように $\sin \theta$ が大きく観測され、その分だけ得られる波長の値はみかけ上大きくなってしまう。 $\alpha=30^\circ$ とすれば、波長の値は本来の値よりも 1.15 倍の値となるは

ずである。これを定量的に確認することは、それなりに興味深いかもしれないが、これでは回折格子の本来の機能である分光について学生は学ぶことができないと考えた。

そこで、理学部学生対象の実験のテキストについて次のように改訂し³⁾⁴⁾、課題の内容を変更した。

- (1) Na ランプだけでなく、Hg ランプ、Cd ランプの発する光を観測する。Hg ランプ、Cd ランプにおいては表1に示す複数の線スペクトルが観測されるので、それぞれの発光について波長を求め、理科年表と比較して議論することとした。
- (2) Hg ランプ、Cd ランプの発する色は青く見えるのに、回折格子を通すと様々な色が観測される理由について考察させることとした。このことにより、回折格子の分光の機能をはっきりと認識させることができると考えたからである。
- (3) これに加えて、理科年表の値との差異を議論するために、角度の読み取り限界とそれに対応した、求められる波長のずれについての計算問題を予習課題の1つとした。

5. 改訂テキストによる実習

5.1 回転盤上の角度の読み取り限界と求められる波長のずれ

本実験ではテキスト中に、それぞれの実験の基礎となる理論を学生がよりよく理解できるように、予習段階で解くべき予習課題として2-3題を課している。この中の一つとして、

$\theta=6^\circ43'$ と $\theta=6^\circ53'$ の場合について、 $n=200 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ としてそれぞれ光の波長 λ を計算せよ。この計算結果から考えて、光の波長を 10nm の精度で測定しようとする

表1 分光計を用いた、回折格子による Na, Hg, Cd ランプの発光波長の測定結果

ランプ	色	理科年表に掲載されている波長 ²⁾ (nm)	本実験課題の実習によって求められた波長 (nm)	グループ数
Na	オレンジ	589.5924 588.9951	581.0 \pm 15.2	23
Hg	黄	579.0670 576.9610	573.8 \pm 9.1	22
	緑	546.0750	544.5 \pm 10.9	22
	青紫	435.8335 407.7837	434.2 \pm 6.4	20
	紫	404.6565	400.6 \pm 18.7	14
Cd	赤	643.8470	639.7 \pm 8.7	10
	緑	508.5822	506.4 \pm 9.4	22
	明青	479.9912	479.9 \pm 7.9	22
	濃青	467.8149	467.5 \pm 5.4	19
	青紫	441.563	438.7 \pm 1.9	3

るとき、 θ_1 はどれくらいの精度で測定する必要があるか。

という課題を新たに設定した。この課題の解は

$\theta=6^\circ43'$ の場合 $\lambda=585\text{ nm}$

$\theta=6^\circ53'$ の場合 $\lambda=599\text{ nm}$

となり、 $10'$ の角度の差に対して波長は 15 nm の差となる。角度 θ と波長 λ が近似的に比例していると考えれば、 10 nm の精度で波長を測定したければ、角度は約 $7'$ の精度で測定する必要がある。

となる。実際の測定においては、ノギスの原理を用いて回転盤上の角度を読み取る。分単位で読み取れるが、本尺と副尺で合っていると判断される目盛に多少のあいまいさがあるため、角度の読み取り精度としては $2'-3'$ 程度となる。従って、この程度に正確に実験が行われていれば、 5 nm 程度の精度で波長が理科年表の値と一致するはずである。

5.2 求められた波長の実際

Na ランプの発するオレンジ色の 1 種類の発光のほか、Hg ランプの発する黄、緑、青紫、紫色の 4 種類、Cd ランプの発する赤、緑、明青、濃青、青紫色の 5 種類の発光について、それぞれ回折角を計測し、波長を求める実習を行った。2015 年春学期の応用物理学科 1 年生、また 2015 年秋学期の化学科、生物化学科、臨床生命学科、動物学科 1 年生を対象に行った物理学基礎実験の授業において合計 23 グループがこの回折格子の課題に取り組んだ。求められた波長について、その平均値とばらつき（標準偏差）を、表 1 にまとめた。ここで、Na ランプのオレンジ色の発光の波長はすべてのグループが求めているが、他のランプの発光については、ランプの明るさなどの実験条件や、取り組んだ学生の意欲などに左右されて、すべてのグループがすべての発光について波長を求めているわけではない。また、あまりにも理科年表の値から離れた (100 nm 以上) ものについては統計から外した。

求められた波長にばらつきはあるものの、全体としては、ほぼ、求められるべき理科年表の値と一致した結果が得られているといえる。この中で、ナトリウムランプのオレンジ色の発光についての波長のばらつきが最も大きくなっている。これは、実験手順の中で最初に測定するように指示をしていて、慣れないために求められた波長にばらつきが大きくなった可能性が高い。Hg, Cd ランプとも紫、青紫色の発光は強度が弱くてごく薄くしか観測されないため、波長を求めることのできたグループ数が少なくなっている。また、Hg ラ

ンプの紫色では、観測が難しかったためにばらつきが大きくなったのかもしれない。

また、波長のばらつきは、上記の 2 つの発光を除いて、全体としては、前節で議論した角度の読み取り限界よりも大きく、 $5-10\text{ nm}$ となった。このことは得られた波長のばらつきの原因は、角度の読み取り限界の問題に加えて、学生の実験技術の習熟が十分でないことを示しているともいえる。しかし、得られた波長の値は統計的には理科年表の値と誤差の範囲で一致しており、多くの学生にとっては、実験結果が成功体験として印象付けられたと思われる。

新たに設けた、角度のずれと波長のずれとの関係に関する予習課題の解答を用いて、角度の読み取り限界に起因して予想される得られる波長のずれと、実際に得られた波長のずれとの関係を議論することを期待したが、こうした議論はレポート中ではなされていないのが現状である。この点への考察を勧めることは今後の課題である。

他方、実験の改訂に伴って、回折格子の面を光路に対して垂直に置くようにという手順はテキストに記載したが、その重要性については言及していない。もし、回折格子が光路に対して垂直に置かれていないことが、測定された波長のばらつきの原因であれば、波長の大きい方へ系統的に測定値がずれるはずであるが、そのような結果になっていないので、このことはそれほど実験結果に影響していないと考えられる。しかし、今後、テキストを改訂する際には、回折角が最も小さく観測されるように回折格子を設置するようにする、といった細かな調整についても手順に入れるべきであろう。

5.3 回折格子の分光機能について

提出されたレポートにおいて、本実験の目的の 1 つとして掲げた回折格子の分光機能について、よく理解ができていると考えられる記述が最初から行われていたものはごく少数であった。理化学的な現象に対する経験が必ずしも十分ではなく、目で見たまかけの光は青く見えるのに、回折格子を通すと様々な色が観測されるということ自体に、理由を考えるべき価値のある事象であるという自覚を学生はそもそも持たないようである。しかし、一方で、プリズムを用いれば白色光が虹色に分かれることはよく知っており、分光という意味では共通であるこれらの現象の相互の関係がよく理解できないのであろう。また、原理の異なるプリズムと回折格子とについてその原理を混同する記述もしばしば見られた。実際の実習では、提出されたレポートを基に、作成した学生と、さまざまな色が観測されることが不思議なことではないのかといった議論をし、

最終的には回折格子の分光の機能について、適切な記述になるように指導をしてきている。

6. まとめ

本学理学部の学生対象の物理学基礎実験で、回折格子を用いて発光波長を求める実験において、テキストを改訂した。回折格子の重要な機能である分光がよりよく理解できるよう、Na ランプだけでなく、Hg, Cd ランプの複数の発光を測定させるように、またその測定精度を理解するための予習課題を加えるなどの改善を試みた。

得られた実験結果は、おおそ当初期待したように、Na, Hg, Cd ランプの複数の発光の波長について、理科年表の値と一致した結果が得られている。

この実験内容、また分光の機能についての学生の理解をより一層深めるためには工夫の余地はあるが、これらは次の実験テキストの改訂の際の課題である。

引用文献

- 1) 岡山理科大学理学部共通講座・工学部共通講座物理学教室 (1992) 物理学実験書 p.56-62, 大学教育出版.
- 2) 国立天文台 (2016) 理科年表 丸善.
- 3) 岡山理科大学理学部応用物理学科 (2006) 改訂物理学基礎実験 p. 61-66, 大学教育出版.
- 4) 岡山理科大学理学部応用物理学科 (2014) 第3版物理学基礎実験 p. 70-75, 大学教育出版.

Revision in Basic Physics Experiment for better understanding of spectroscopy with a grating

Shin TOYODA, Mika MURAHASHI*, and Kazuya MIYAGAWA

Department of Applied Physics, Faculty of Science

**Graduate School of Science*

Okayama University of Science

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama, 700-0005, Japan

(Received October 20, 2016; accepted December 5, 2016)

The text for Basic Physics Experiment course for students in Faculty of Science was revised in order for students to have better understanding of light spectroscopy with a grating. Previously, in the theme of the “Grating”, students had been supposed to determine just the wavelength of the orange light from a Na lamp using a spectrometer together with a grating. In the new revised text, the students are now asked to determine the wavelengths up to 10 colors of lights from Na, Hg and Cd lamps. New questions to be solved in advance of the experiment and after obtaining the wavelengths were also added to have an idea for the precision of the spectroscopy and to have the understanding of the function of a grating in visual light spectroscopy. The results of spectroscopy worked by 23 student groups showed good agreement with the literature values, indicating that the revision was successful. However, still efforts are necessary to have students understand the essential function of grating in spectroscopy.

Keywords: grating; spectroscopy; Basic Physics Experiment